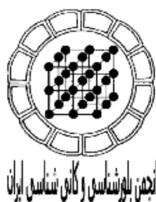
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی



سال بیست و هشتم، شمارهٔ دوم، تابستان ۹۹، از صفحهٔ ۲۹۷ تا ۳۱۰

اثر شیمی سنگ کل در الگوی توزیع اندازه بلور گارنت در سنگ‌های رسی دگرگونه- قیاس شیست‌های شاهیندژ با هورنفلس‌های اشنویه

منیر مجرد*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۳/۴، نسخه نهایی: ۹۸/۶/۱۲)

چکیده: در این پژوهش، نقش ترکیب شیمیایی سنگ مادر دگرگونی بر الگوی توزیع اندازه بلور گارنت در سنگ‌های رسی دگرگونه بررسی شد. از دو گروه سنگ رسی دگرگونه ناحیه‌ای (شیست‌های شاهیندژ) و مجاورتی (هاله دوربه اشنویه) تصویر کامل موزاییکی تهیه و پردازش تصویری شد و الگوها رسم گردید. تعداد هسته‌ها در هورنفلس‌ها یک چهارم شیست‌ها بوده ولی میزان رشد در هورنفلس‌ها بیش از ۴۰ برابر بوده است. این امر افزون بر درجه بالای خروج از حالت تعادل طی دگرگونی ناحیه‌ای چندفازه، بیانگر حضور مؤثر سیال غنی از آب در هاله مجاورتی با نقش بازدارندگی از هسته‌بندی و کمک رسانی برای انتقال یون‌ها به مکان هسته‌ها بوده و با در نظر داشتن ترکیب مشابه آلماندنی گارنت‌ها در هر دو گروه، نشانه ترکیب شیمیایی مساعد سنگ کل هورنفلس‌ها نسبت به شیست‌هاست.

واژه‌های کلیدی: *توزیع ابعاد بلوری؛ گارنت؛ هسته‌بندی و رشد؛ سنگ رسی دگرگونه؛ ترکیب سنگ کل.*

مقدمه

بررسی جمعیت‌های بلورین و مسائل آماری در بلورها دریچه‌ای بسوی درک فرایندهای تاریخچه تبلور در سنگ‌های آذرین و دگرگونی گشوده است [۱]. ابعاد بلور در سنگ‌های آذرین و دگرگونی وابسته به سرعت رشد و مدت زمان رشد است. بنابراین منحنی تعداد بلورها نسبت به اندازه آنها می‌تواند دربردارنده اطلاعات تبلوری باشد [۲-۴]. از رایج‌ترین روش‌ها در اندازه‌گیری‌های بافتی، روش پراکندگی یا توزیع اندازه بلور (CSD) است که در واقع بازتاب کننده ویژگی‌های ذاتی یک سنگ چون چگالی و یا ترکیب آن‌ها است [۵]. سرعت و زمان تبلور بر پایه توزیع اندازه بلورها در سنگ‌های آذرین و دگرگونی به طور گسترده در دهه نود میلادی بررسی شده است [۶]. نظریه CSD نخستین بار توسط لارسون و راندولف [۷] ارائه شد و نخستین کاربرد زمین‌شناسی آن توسط کاشمن و مارش [۸] در دریاچه‌های گدازه‌ای ماکوپولی انجام شد [۵، ۷]. در دهه‌های اخیر، پژوهش پیرامون CSD بسیار مورد توجه بوده است و از آن برای درک بهتر فرایندهای حاکم بر لانه ماگمایی و نسبت اهمیت عوامل درگیر در فرایند تبلور دگرگونی بهره برده می‌شود (برای مثال: [۱، ۹-۱۴]. ترکیب گارنت و بافت‌های آن برای درک شرایط دگرگونی از جمله دما، فشار، ترکیب سیال و مدت دگرگونی و نیز فرایندهای زمین ساختی بسیار مفید است. همچنین، توزیع گارنت و آگاهی از چگونگی هسته‌بندی و نحوه رشد آن اطلاعاتی درباره تبلور دگرگونی و سازوکارهای آن فراهم می‌کند [۱۵].

پژوهش‌های بر پایه CSD در ایران

در ایران، بررسی توزیع اندازه بلوری در اوایل دهه ۸۰ شمسی با کارهای همام [۱۶] و مؤذن و مجرد [۱۷] بر سنگ‌های دگرگونی آغاز و در اواخر آن دهه با کارهای آیتی و مهدوری [۱۸] و زندی فر و همکاران [۱۹] پی گرفته شد. این بررسی‌ها در دهه ۹۰ شمسی سرعت بیشتری گرفت و رئیسی و همکاران

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۳۴۵۰۴۵۲، نمابر: ۰۴۴۳۲۷۵۳۱۷۲، پست الکترونیکی: m.modjarrad@urmia.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.3.5]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.297]

[۲۰]، ترکیان و همکاران [۲۱]، رحیمی چاکدل و بویل [۲۲]، مجرد و شیخ بگلو [۲۳]، مجرد [۲۴]، مجرد و شیخ بگلو [۲۵]، کاظمی و همکاران [۲۶]، برزگری و همکاران [۲۷] و مجرد [۲۸] پیرامون CSD پژوهش کردند. در این میان، بیشترین بررسی انجام شده بر سنگ‌های آذرین و بیشتر بلور پلاژیوکلاز متمرکز بوده که با توجه به شکل هندسی این کانی، اندازه-گیری‌های کمی بر آن ساده‌تر و دقیق‌تر است. پژوهش پیرامون سنگ‌های دگرگونی بسیار محدود بوده است؛ از این رو به نظر می‌رسد که تمرکز بر این موضوع در بلورهای دگرگونی در ایران برای درک بهتر رخدادهای در ارتباط با هسته‌بندی و رشد طی فرایند دگرگونی ضروری است.

در این پژوهش، CSD گارنت در سنگ رسی دگرگونه‌های دو ناحیه شیست‌های مجموعه شاهیندژ و هورنفلس‌های دوربه اشنویه در جنوب آذربایجان غربی بررسی شد. هر دو منطقه پیشتر از نظر فرایندهای دگرگونی، روابط فازی و برآورد دما و فشار توسط نویسنده بطور گسترده بررسی شده‌اند [۲۹-۳۳] که در این نوشتار به برخی نتایج آنها استناد شده است. نتـایج ایـن بررسی‌ها می‌تواند تأیید کننده‌ی نوع دگرگونی ناحیه‌ای یا مجاورتی منطقه و همچنین بیانگر تفاوت در نرخ هسته‌بندی و درشت‌شدگی بلور در کانی گارنت با توجه به ترکیب سنگ کل باشد.

زمین‌شناسی منطقه

شیست‌های همتافت شاهیندژ

منطقه همتافت شاهیندژ در پهنه ایران مرکزی واقع است [۳۴] و سنگ‌های رسی دگرگون شده، قدیمی‌ترین واحد دیده شده در آن هستند (شکل ۱). این منطقه با توجه به وجود انواع سنگ‌های دگرگونی و ارتباط سنگ‌های دگرگونی و آذرین موجود در آن همتافت دگرگونی شاهیندژ[1] و باختصار SMC نامیده شده است [۲۹]. این سنگ‌ها به احتمال بسیار با واحدهای دگرگونی تفکیک نشده در ایران مرکزی (پشت بادام) هم ارز هستند. کوهزایی کاتانگائی در پرکامبرین پسین رخ داده است و بر اثر آن، سنگ‌های پیش از اینفراکامبرین (پروتروزوئیک و آرکئوزوئیک) دچار گسل‌خوردگی، چین-خوردگی و دگرگونی شده‌اند. رسوب‌های کهر روی این سنگ‌ها دگرگونی ضعیفی در حد اسلیت و فیلیت نشان می‌دهند (مربوط به فاز محدود زریگانین). سنگ‌های دولومیتی و فسیل-دار (شواریا و سیرکولاریس) سازند سلطانیه واحد بعدی است که در شمالغرب و جنوبغرب منطقه دیده می‌شود (شکل ۱).

هاله مجاورتی دوربه

هاله مجاورتی دوربه در شمال شهرستان اشنویه آذربایجان غربی، شامل هورنفلس‌های رسی، سیلیکات‌های آهکی و مرمرهای کلسیتی-دولومیتی است (شکل ۲). سنگ رسی دگرگونه‌ها دربردارنده شکفته بلورهای کلریتوئید، گارنت، کردیریت، آندالوزیت و بلورهای ریز سیلیمانیت و در برخی نمونه‌ها، هرسی نایت و گرافیت هستند. مهمترین ویژگی هاله مجاورتی دوربه وجود بافت‌های واکنشی شاخص در هورنفلس-های رسی است که بر اساس آنها واکنش‌های رخ داده در این سنگ‌ها تعیین شده‌اند. روابط بافتی و همبرزایی بین کانی‌ها بیانگر بالا بودن درجه خروج از حالت تعادل[2] در این هاله مجاورتی است. بر اساس نمودار سنگ‌زایی رسم شده توسط نرم‌افزار ترموکالک، کمترین دمایی که درجه بالاترین پهنه هاله مجاورتی اسلاملو (پهنه گارنت – کردیریت - سیلیمانیت) دستخوش متحمل شده حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در فشار ۲ کیلوبار برآورد شده است [۳۲].

سنگ‌نگاری، برآورد شرایط دگرگونی، ترکیب کانی و شیمی سنگ کل

شیست‌های شاهیندژ

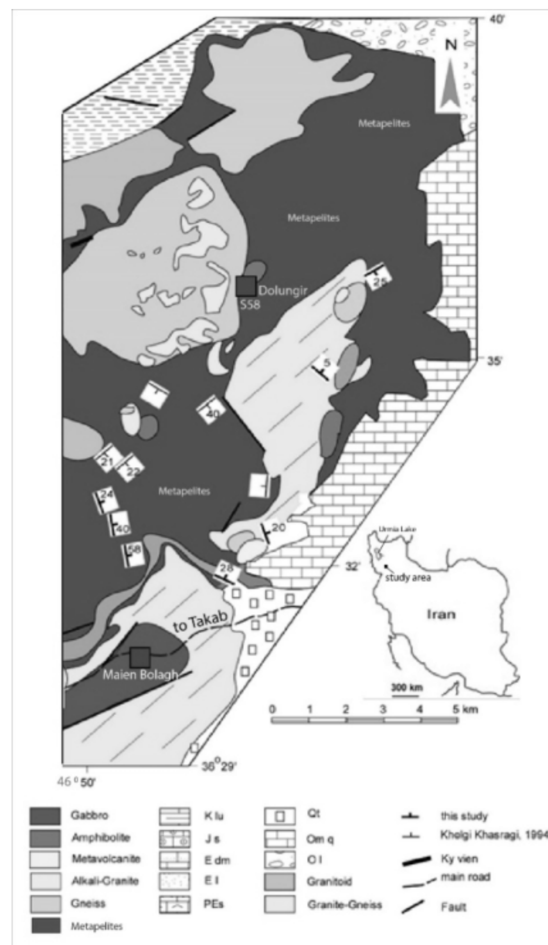
منطقه‌ای به مساحت حدود ۶۰۰ کیلومتر مربع در شرق شاهیندژ آذربایجان‌غربی، تنوعی از سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی را در خود جای داده است (شکل ۱). سنگ‌های دگرگونی آن عبارتند از سنگ رسی دگرگونه، آمفیبولیت، مرمر، متاولکانیت و پاراگنیس. متاپلیت‌ها و گنیس‌ها جهت یافتگی ترجیحی نشان می دهند [۳۰، ۳۱].

پژوهش‌ها نشان داده است که در این منطقه، دست کم دو فاز دگرگونی ناحیه‌ای و یک فاز دگرگونی مجاورتی به همراه فازهای دگرشکلی متعدد بر سنگ‌های مجموعه اثر گذاشته که در سنگ رسی دگرگونه‌ها کانی‌هایی چون کردیریت، گارنت (شکل ۳)، کیانیت، آندالوزیت، فیبرولیت و استارولیت را طی فازهای مختلف ساخته و روابط بافتی پیچیده‌ای بین کانی‌ها حاکم است [۳۰].

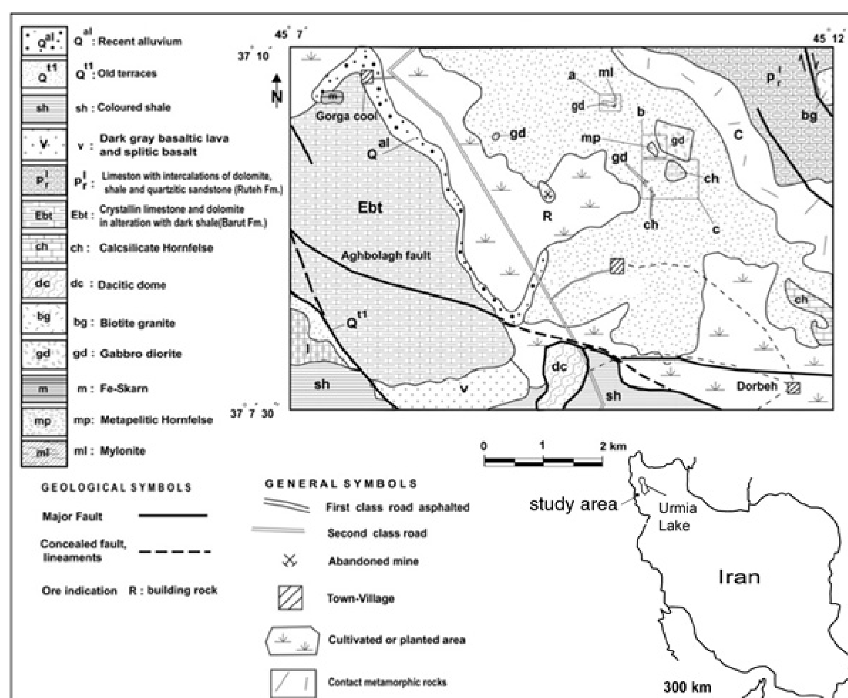
1 - Shahindezh Metamorphic Complex

2 - Overstepping

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.3.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.297]



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی از منطقه همتافت دگرگونی شاهیندژ (SMC) در جنوب آذربایجان غربی [۳۰].



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ساده شده از توده نفوذی اسلاملو و هاله مجاورتی منطقه دوربه اشنویه در جنوب آذربایجان غربی [۳۲].



شکل ۳ تصاویر نمونه دستی از سنگ رسی دگرگونه‌های مورد بررسی. الف: هورنفلس‌های دوربه اشنویه. ب: شیست‌های همتافت شاهیندژ (SMC).

طیف سنجی فلئورسانس پرتوی X (XRF) تک بلورهای جداشده گارنت از شیست‌های شاهیندژ ترکیب آنها را بیشتر از نوع آلماندن Alm_{74-86} Py_{4-23} $Sps_{1.5-20}$ $Grs_{0.6-8}$ نشان داده است [۲۹].

بیشترین دما بر پایه روش‌های دماسنجی گارنت-بیوتیت ۶۷۰ تا ۷۲۰ درجه سانتیگراد بوده است. بر این اساس، نوع دگرگونی منطقه SMC از نوع HT/L-MP ارزیابی شده است. زمین‌شیمی عناصر اصلی (جدول ۱)، سنگ رسوبی اولیه را بیشتر از نوع شیل ارزیابی می‌کند. بررسی اکسیدهای عناصر اصلی، واسط و کمیاب (مانند K_2O, TiO_2, Rb, Ni) ماهیت حد واسط تا اسیدی در حد آندزیت تا ریوداسیت را برای سنگ آذرین مولد این رسوب‌ها نشان می‌دهد. درجه دگرسانی شیمیایی (CIA) سنگ آذرین اولیه در حد متوسط به بالا و پلاژیوکلاز آن از نوع آندزین تا الیگوکلاز بوده است. براساس اکسید عناصر اصلی، محیط زمین‌ساختی تشکیل رسوب‌های اولیه کرانه فعال قاره مشخص شده است [۳۵].

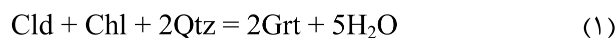
جدول ۱ مقایسه ترکیب سنگ کل شیست‌های شاهیندژ [۳۵] و هورنفلس‌های دوربه [۳۳].

	سنگ کل شیست های شاهیندژ (SMC)				سنگ کل هورنفلس های دوربه اشنویه			
	S58T	S58P	S58N		E 87	E 74	E 86-1	E 83
SiO_2	۷۱/۴	۶۴/۸	۶۴/۷		۳۴/۵۷	۳۸/۳	۳۵/۱۸	۳۱/۳۱
TiO_2	۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۸۶		۱/۷۸	۶/۱۱	۶/۲۰	۷/۵۷
Al_2O_3	۱۲/۶	۱۳/۴	۱۵/۱		۲۱/۰۲	۲۳/۶	۲۸/۶۹	۳۵/۸۰
Fe_2O_3	۵/۹۰	۱۰/۰۴	۷/۷۲		۴۰/۷۳	۲۶/۲۱	۲۵/۸۰	۲۰/۸۴
MnO	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۲۹		۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴
MgO	۲/۲۸	۲/۹۶	۳/۲۰		۲/۰۳	۱/۶۷	۱/۸۵	۱/۰۵
CaO	۰/۴۷	۰/۹۱	۰/۶۴		۰/۳۲	۰/۵۳	۰/۲۱	۰/۴۵
Na_2O	۲/۹۶	۲/۹۲	۰/۹۸		۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۶۹
K_2O	۱/۳۶	۱/۸۴	۲/۷۳		۱/۰۲	۱/۶۲	۰/۸۴	۱/۰۷
P_2O_5	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۳۲		۰/۱۵	۰/۳۲	۰/۰۹	۰/۲۷
مواد فرار					-۰/۳۴	۲/۴	۱/۵۶	۰/۹۵
H_2O	۱/۶۲	۱/۷۲	۳/۱۳					
مجموع	۹۹/۷	۹۹/۷	۹۹/۵		۱۰۱/۴۱	۱۰۰/۷۴	۱۰۰/۷۰	۱۰۰/۰۴

هورنفلس‌های دوربه

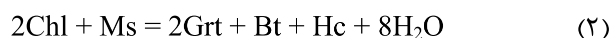
هورنفلس‌های رسی هاله مجاورتی دوربه در نمونه دستی بسیار متراکم و تیره رنگ هستند (شکل ۳ الف). تنها کانی قابل مشاهده در نمونه دستی این سنگ‌ها گارنت و در مواردی بیوتیت است. اکسیدهای آهن به رنگ قهوه‌ای سوخته در این سنگ‌ها دیده می‌شود. این سنگ‌ها دارای شکستگی صدفی بوده و سخت و ناصاف هستند. بافت این سنگ‌ها بیشتر شکفته بلوری و دانه‌ای است و در برخی از نمونه‌ها، بافت ضربدری برخی از کانی‌ها را می‌توان دید. شکفته بلورهای کلریتوئید، آندالوزیت، گارنت، و کردیریت به همراه بلورهای کوچک سیلیمانیت و هرسی نایت مهم‌ترین کانی‌های دیده شده، افزون بر میکاها در این سنگ‌ها هستند.

یکی از همبرزادهای مربوط به گارنت: Grt+Chl+Qtz±Cld است. در برخی از نمونه‌ها، کانی کلریتوئید دیده نمی‌شود که به احتمال بسیار بدلیل مصرف کامل آن است. با توجه به این همبرزایی و روابط بافتی، می‌توان واکنش زیر را برای تشکیل نخستین نسل این کانی پیشنهاد نمود:



$$Cld + Chl + 2Qtz = 2Grt + 5H_2O \quad (۱)$$

همبرزاد بعدی دیده شده در این سنگ‌ها شامل Grt+Chl+Bt+Ms+Hc است. کانی بیوتیت در متن کانی گارنت دیده می‌شود و همچنین کانی کلریت ارتباط همبرزایی بارزی با کانی گارنت نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود در این همبرزایی، کانی کلریتوئید وجود ندارد که به احتمال بسیار در این پهنه به طور کامل مصرف شده است. در برخی از نمونه‌ها، کانی هرسی‌نایت نیز بصورت میانبار در متن کانی گارنت دیده می‌شود؛ از این رو احتمال رخداد واکنش‌های زیر وجود داشته است:



$$2Chl + Ms = 2Grt + Bt + Hc + 8H_2O \quad (۲)$$



$$12Cld + 5Bt + 9Qtz = 4Grt + 3Chl + 5Ms \quad (۳)$$

بر اساس بررسی‌های XRF پیشین بر گارنت‌های این ناحیه [۳۲، ۳۶]، ترکیب آنها در حد آلماندن بوده و آهن اصلی‌ترین کاتیون فلزی در آن است: $Alm_{88}\ Py_{7}\ Grs_{4}\ Sps_{1}$. همچنین بر اساس نتایج XRD، گارنت آلماندنی منگنزدار کانی اصلی سنگ رسی دگرگونه‌های هورنفلسی گارنت‌دار بوده و کلریت، آندالوزیت ایلمنیت در کنار فازهای همیشه در دسترس کوارتز، مسکویت و سازنده‌های اصلی این سنگ‌ها بوده‌اند [۳۶].

منحنی‌های تعادلی واکنش‌های رخ داده در هاله دوربه بر اساس داده‌های نرم افزار ترموکالک رسم شد. بر اساس این نمودار سنگ‌زایی، و از آنجاکه در پهنه گارنت-کردیریت-سیلیمانیت، بلورهای سیلیمانیت منشوری در کانی آندالوزیت دیده می‌شوند، محل تقاطع واکنش‌های اوج دگرگونی در هاله مجاورتی دوربه مشخص می‌شود، به طوری که کمترین دمایی که این هاله تجربه کرده است حدود ۷۰۰ درجه سانتی گراد در فشار حدود ۲ کیلوبار برآورد شده است.

سنگ مادر رسوبی از نوع شیل آهنی و ماسه سنگ تیره بوده است. با توجه به مقدار بالای آهن و آلومینیوم (جدول ۱)، این نمونه‌ها از نوع لاتریت هستند. شاخص‌های شیمیایی دگرسانی در این سنگ‌ها بیانگر شدت بسیار بالای هوازدگی خاستگاه آذرین است. این امر باعث بالا بودن مقدار آلومینیوم در این سنگ‌ها شده است. بر اساس اکسیدهای عناصر اصلی، محیط زمین‌ساختی تشکیل سنگ مادر آذرین سنگ رسی دگرگونه‌های اشنویه کرانه فعال قاره بوده است [۳۳].

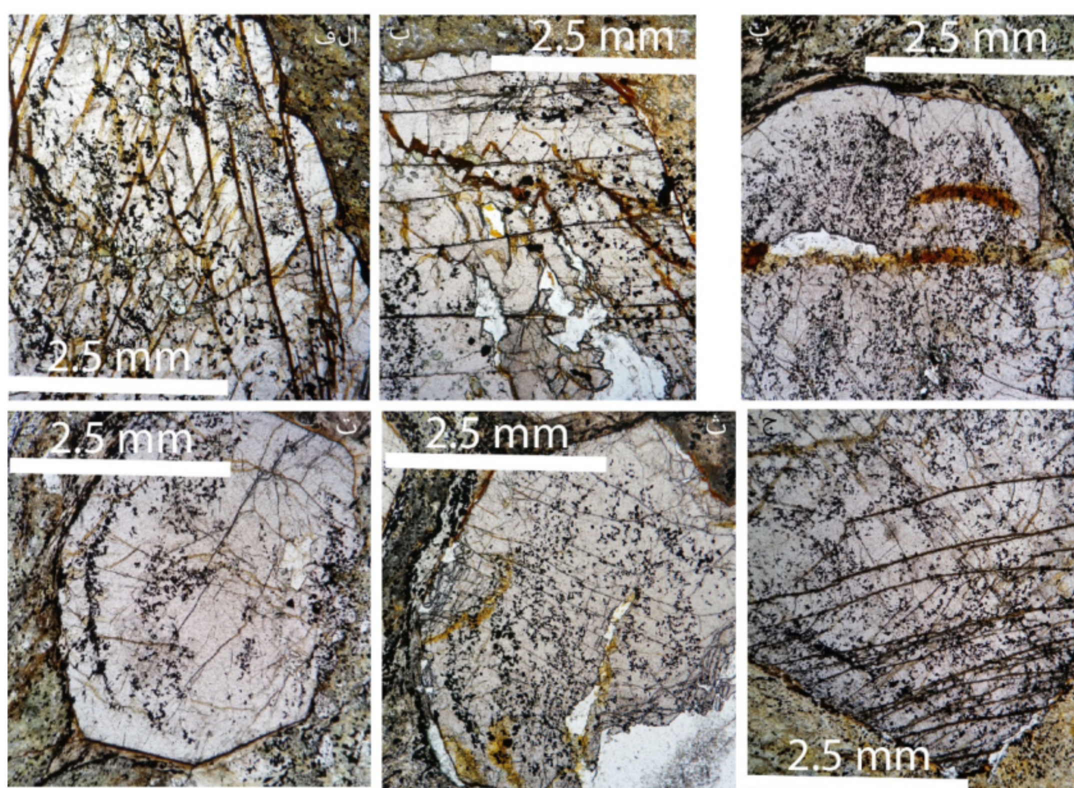
روش بررسی

بخش اصلی بررسی‌های CSD یک نمودار نیمه لگاریتمی چگالی تراکمی حجمی بلـورها بر واحد اندازه‌ی بلور است. برای انجام بررسی کمی توزیع اندازه بلور، نخست از نمونه‌های سنگی مقاطع نازک تهیه شد. سپس از آنها با عدسی ۲٫۵ عکس برداری دیجیتالی صورت گرفت (شکل‌های ۴ و ۵). با استفاده از نرم افزار فتوشاپ عکس‌های گرفته شده از مقاطع بصورت موزائیکی در کنار هم قرار داده شد تا تصویری کامل از کل مقطع نازک سنگ فراهم شود. سپس لبه‌های بلورهای مورد نظر با استفاده از نرم افزار Illustrator بصورت دوتایی رسم شد این تصاویر با نرم افزار Digimizer تحلیل شد و طول و عرض بلورها و مساحت هر دانه محاسبه گردید نمودارهای CSD بر پایه این داده‌ها با نرم افزار CSD Corrections رسم شد. ترکیب سنگ کل هر دو گروه و نیز ترکیب تک کانی گارنت در آنها برگرفته از نتایج پیشین است.

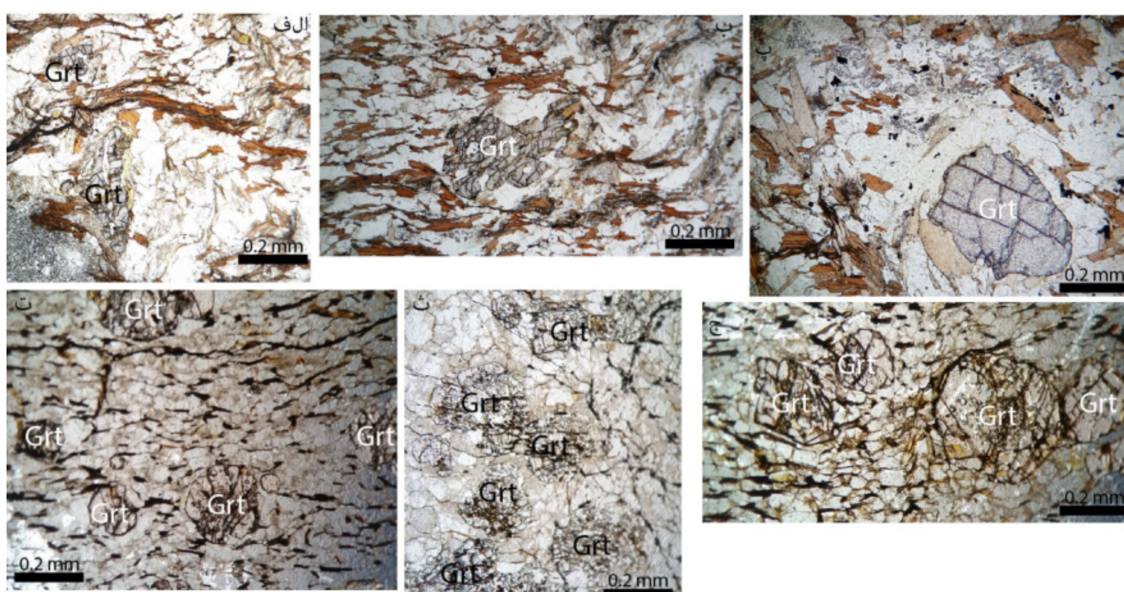
روش کلی CSD

الف) روش رسم: داده‌های CSD بر یک نمودار ln(n) نسبت به L رسم می‌شود، که در آن L بزرگترین بعد بلور و n چگالی تجمعی بلور است. هر دوی این پارامترها زیر مجموعه‌ای از یک پارامتر دربردارنده اطلاعات بیشتر، یعنی توزیع اندازه‌ی بلور (CSD) است. که دو بعد دارد: اندازه و تعداد بلور. چگالی

تجمعی به صورت تعداد بلورهای یک کانی در واحد حجم در مجموعه‌ای از گستره‌های اندازه تعریف شده و از رابطه $n = dN/dl$ به دست می‌آید که در آن N تعداد بلورها و dl اندازه‌ی بلورهاست. این پارامتر از رابطه‌ی $n = n_0 exp(-L/Gt)$ نیز قابل محاسبه است که در آن n_0 میزان هسته‌بندی نهایی (محل تلاقی اندازه دانه‌ها با محور چگالی تجمعی) است. G نرخ رشد بلور و t زمان اقامت بلور است. عرض از مبدأ این خط یا نقطه تقاطع آن با محور چگالی تجمعی نیز برابر با چگالی هسته بندی اولیه N^0 است. یکای اندازه‌ی بلورها mm و برای چگالی تجمعی بلورها mm^{-4} است [۳۷].



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از هورنفلس‌های گارنت‌دار دوربه اشنویه بصورت شکفته بلور شکل‌دار در متنی از دانه‌های ریز.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از شیست‌های گارنت‌دار شاهیندژ (SMC) بصورت منفرد در متن جهت‌یافته سنگ.

[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.297]

ب) تفسیر: کیفیت CSDها به طور اساسی به اندازه نمونه (تعداد کل بلورها) بستگی دارد. پیچش یا خمیدگی در نمودارهای CSD به فرایندهایی چون انباشت و از بین رفتن بلور، تراکم، آمیختگی جمعیت‌های بلوری و هسته بندی نهایی بلور در اثر بازپخت یا بلوغ بافتی استوالد نسبت داده می‌شود [۳۸]. نوع مستقیم یا بخش‌های کم انحنای CSD، می‌تواند رگرسیون‌دار شده و شیب و محل تقاطع آن تعیین شود. تقاطع با محور تراکم جمعیت برابر با Ln(n) و شیب برابر با (-1/Gt) است. یک بلور با Gt بالا بزرگ و یک بلور با Gt پایین، کوچک است. نرخ هسته بندی از رابطه‌ی $J = n_0G$ به دست می‌آید که G نرخ رشد و n_0 چگالی هسته بندی است.

$$n = dN / dL \qquad n = n_0 e^{-bl}$$
$$n_0 = dN / L$$
$$L = 0 \qquad m_0 = N_T = \int_0^\infty n_0 e^{-bl}\, dL = n_0 / b$$
$$m_1 = L_T = n_0 / b^2$$
$$J = dN / dt \qquad \overline{L} = L_T / N_T = 1/b$$
$$L = 0 \qquad \bar{t} = \overline{L} / \overline{G}$$
$$J = n_0 G \qquad \bar{J} = N_T / \bar{t}$$

در این روابط n شیب خط مماس بر منحنی CSD است. با استفاده از این روابط می‌توان پارامترهای نامبرده را محاسبه کرد.

مقادیر نرخ رشد برای کانی‌های مختلف متفاوت بوده و برای بلورهای گارنت با سیستم مکعبی برابر با ۱:۱:۱ است. همچنین سرعت رشد میانگین برای بلورهای سیلیکاتی برابر با 10^{-10}cm/s در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از نرم افزار در جدول ۲ آورده شده است. همچنین نتایج محاسبات صورت گرفته بر معادله خط الگو در جدول ۳ خلاصه شده است.

بحث و بررسی

شکل نمودار CSD گارنت در سنگ‌های دگرگونی مانند هر بلور دیگری توسط عوامل زیر کنترل می‌شود:

- تعداد هسته‌ها (n) که تابعی از درجه خروج از حالت تعادل است [۱۷] یا سرعت هسته‌بندی (J) که هر چه شیب زمین گرمایی بیشتر باشد یعنی شرایط دگرگونی با شدت بیشتر و در گستره زمانی کوتاه تر به سنگ اعمال شود بیشتر بوده و منجر به تشکیل تعداد هسته بیشتری از بلورهایی می‌شود که در آن شرایط قابلیت تبلور دارند.

جدول ۲ توزیع تعداد بلورها در گستره های تعریف شده اندازه در شیست های شاهیندژ (SMC) و هورنفلس‌های دوربه.

نمونه	گستره اندازه (سانتیمتر)								
	۰٫۰۶۳۱	۰٫۱۰۰	۰٫۱۵۸	۰٫۲۵۱	۰٫۳۹۸	۰٫۶۳۱	۱٫۰۰۰	۱٫۵۸	۲٫۵۱
	شیست های شاهیندژ (SMC)								
S58C	۲	۱۵	۲۲	۲۱	۲	۳	۲		
S58Q	۰	۳	۵	۲					
S58P		۰	۳	۵	۱	۱			
S58S	۱۳	۳۳	۶۶	۲۷	۳				
	هورنفلس های دوربه								
G6						۰	۴	۴	۴
E15b				۰	۱	۳	۶	۲	
E18					۰	۲	۴	۴	
G tot.					۰	۲	۴	۶	۲

	۰٫۰۶۳۱	۰٫۱۰۰	۰٫۱۵۸	۰٫۲۵۱	۰٫۳۹۸	۰٫۶۳۱	۱٫۰۰۰	۱٫۵۸	۲٫۵۱
	شیست های شاهیندژ (SMC)								
S58C	۲	۱۵	۲۲	۲۱	۲	۳	۲		
S58Q	۰	۳	۵	۲					
S58P		۰	۳	۵	۱	۱			
S58S	۱۳	۳۳	۶۶	۲۷	۳				
	هورنفلس های دوربه								
G6						۰	۴	۴	۴
E15b				۰	۱	۳	۶	۲	
E18					۰	۲	۴	۴	
G tot.					۰	۲	۴	۶	۲

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.3.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.297]

جدول ۳ نتایج محاسبات با نرم افزار تحلیل تصویر و نیز برآمده از منحنی **CSD** برای گارنت‌های مناطق مورد بررسی.

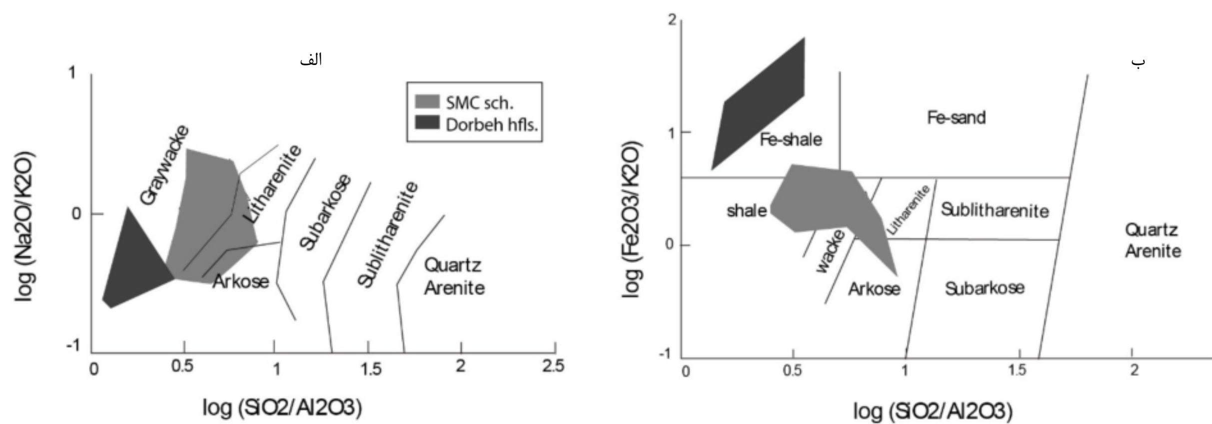
شماره نمونه	مساحت تحت پوشش بلور (cm^2)	متوسط گردشدگی بلور	طول متوسط (cm)	عرض متوسط (cm)	مساحت متوسط هر بلور در این نمونه (cm^2)	شیب خط وایازشی (-1/Gt)	عرض از مبداء خط وایازشی (cm^{-4}) (J/G ratio)	زمان رشد بر اساس سرعت فرضی رشد 10^{-10} (cm/s)
شیست های شاهیندژ (SMC)								
S58C	۱٫۵۴۰	۰٫۷۱۳	۰٫۱۷۷۵	۰٫۱۳۵۳	۰٫۰۲۴	-۹٫۱۹	۸٫۶۴	۳۴٫۴
S58Q	۰٫۰۷۵۸	۰٫۶۷۸	۰٫۱۲۳۳	۰٫۰۹۶۳	۰٫۰۱۲	-۲۳٫۴	۱۲٫۲۳	۱۳٫۵
S58P	۰٫۲۵۳۰	۰٫۶۴۹	۰٫۲۳۰۱	۰٫۱۵۱۴	۰٫۰۳۵	-۱۱٫۴	۹٫۵۰	۲۷٫۸
S58S	۱٫۱۸۷۳	۰٫۷۰۳	۰٫۱۲۶۰	۰٫۰۹۵۳	۰٫۰۱۲	-۱۸٫۸	۱۱٫۲۱	۱۶٫۸
هورنفلس های دوربه								
G6	۱٫۹۱۹۹	۰٫۶۳۶۳	۱٫۱۳۱۲	۱٫۰۰۵	۱٫۱۴	-۱٫۰۴	۱٫۰۵	۳۰۴
E15b	۳٫۹۲۰۵	۰٫۷۹۰۷	۰٫۷۳۴۴	۰٫۶۰۳۰	۰٫۴۴	-۴٫۰۷	۵٫۱۳	۷۸
E18	۲٫۳۸۲۱	۰٫۷۵۳۷	۰٫۹۶۲۶	۰٫۷۰۹۱	۰٫۶۸	-۱٫۲۶	۲٫۰۱	۲۵۱
G tot.	۹٫۹۳۰۳	۰٫۷۴۶۲	۱٫۱۲۰۳	۰٫۹۱۱۷	۱٫۰۲	-۲٫۴۱	۲٫۹۷	۱۳۱

- میزان رشد (G) یا درشت‌شدگی[۳]، که افزون بر تعداد هسته‌ها بیشتر تابع حضور یون‌های شیمیایی مورد نیاز برای رشد یک بلور یعنی ترکیب سنگ کل مناسب برای رشد کانی است. این رشد می‌تواند بر یک هسته منفرد یا چندین هسته نزدیک بهم پیوسته رخ دهد [۳۹].
- زمان در دسترس برای رشد (t) که وابسته به مدت حاکمیت شرایط دگرگونی مناسب برای تشکیل هسته و نیز رشد بلور است.
- شارش سیال (F) که بویژه در هاله‌های مجاورتی به دلیل حجم بالای سیال‌های ناشی از توده آذرین ممکن است بیشتر بوده و باعث سهولت در ترابرد یون‌های مورد نیاز برای رشد بلور شده و نیز مانعی برای ایجاد هسته‌های بیشتر باشد که به نوبه خود باعث رشد بیشتر هسته‌های موجود می‌شود. در این میان، آب از همه سیال‌ها مهمتر است. افزایش فشار بخار آب منجر به افزایش سرعت انتشار یون‌ها و سهولت سازوکار انتقال یون به محل هسته‌بندی شده و باعث رشد قابل توجه یون‌ها می‌شود.
- ترکیب سنگ کل در سنگ‌های دگرگونی یک عامل مهم در شکل منحنی CSD است [۴۰] که بر سازوکار رشد شکفته بلورهای گارنت و سایر کانی‌های دگرگونی اثر دارد. روشن است که بدون یون‌های مورد نیاز برای رشد یک هسته، آن هسته هرگز مجال درشت شدن در حد دیده شدن را نخواهد یافت. ترکیب سنگ کل شیست‌های شاهیندژ و هورنفلس‌های دوربه یکسان نیست (شکل ۶ و جدول ۱).
- مقدار گرمای دریافت شده توسط سنگ دگرگونی [۴۱] و زمان ماندگاری این شرایط به ویژه طی دگرگونی مجاورتی اهمیت دارد (مدلسازی دمایی).
- در کل، شرایط دگرگونی، سیال‌ها و ترکیب آنها بر هسته بندی و رشد بلورها اثر گذار است که این در منحنی CSD خود را نشان می‌دهد و از طریق آن می‌توان به اطلاعات مهمی دست یافت [۱۱].

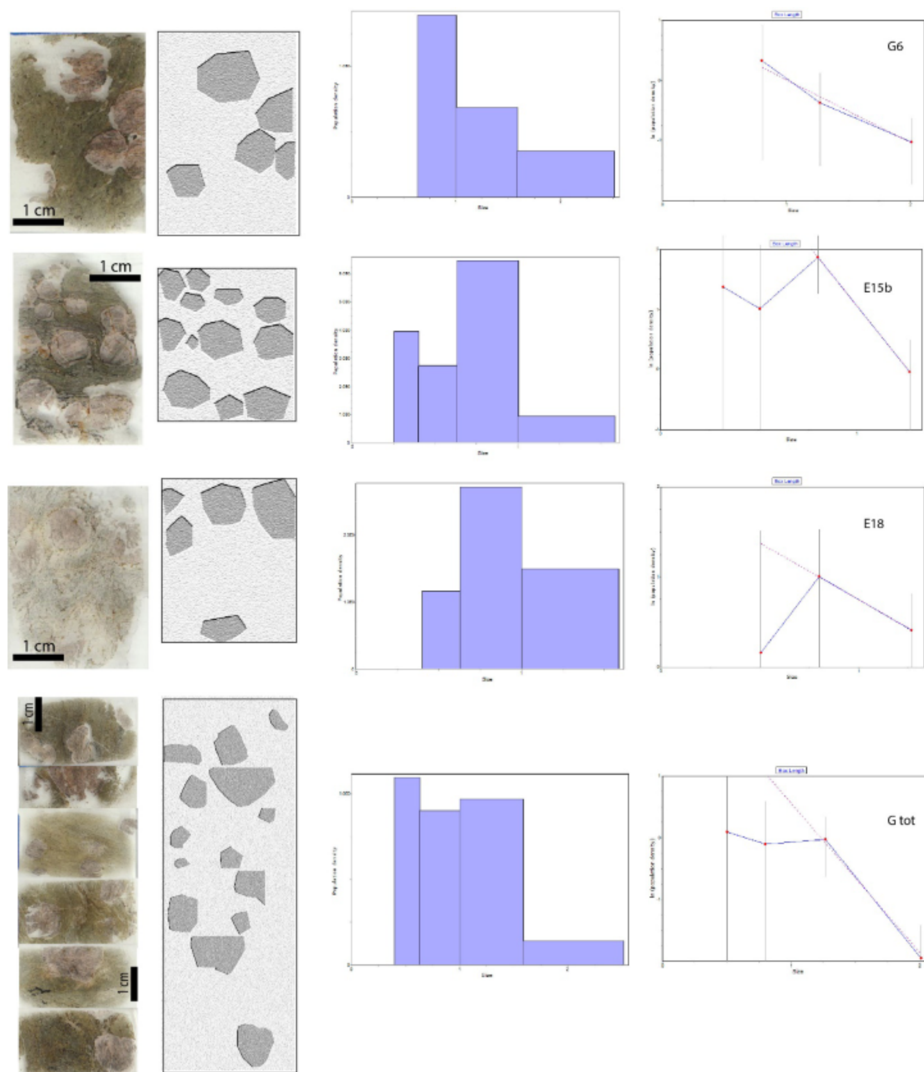
در بررسی الگوی CSD هورنفلس‌های هاله دوربه (شکل ۷) روشن است که تبلور دانه‌ها در اثر یک فاز دگرگونی است، زیرا بجز یک تحدب به بالا در ابتدای الگو که بدلیل افزایش ناگهانی درجه خروج از حالت تعادل در هاله و در پی آن بالا رفتن نرخ هسته‌بندی به رشد (عرض از مبدأ نمودار)، بقیه الگو کاملا خطی و نزولی است که نشانه کاهش هسته‌بندی و بیشتر بودن سرعت رشد نسبت به سرعت تشکیل نطفه‌های گارنت است. در نمودار CSD شیست‌های شاهیندژ (شکل ۸)، پیچیدگی بیشتری دیده می‌شود به طوری که افزون بر یک تحدب به بالا در آغاز تبلور و دگرگونی، نمودار دارای دو شیب کاملا مشخص نخست بسیار تند و در پایان با شیب کمتر است که خود نشانگر نقش دست کم دو فاز دگرگونی مجزا در تبلور گارنت‌هاست.

3 - coarsening

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.3.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.297]

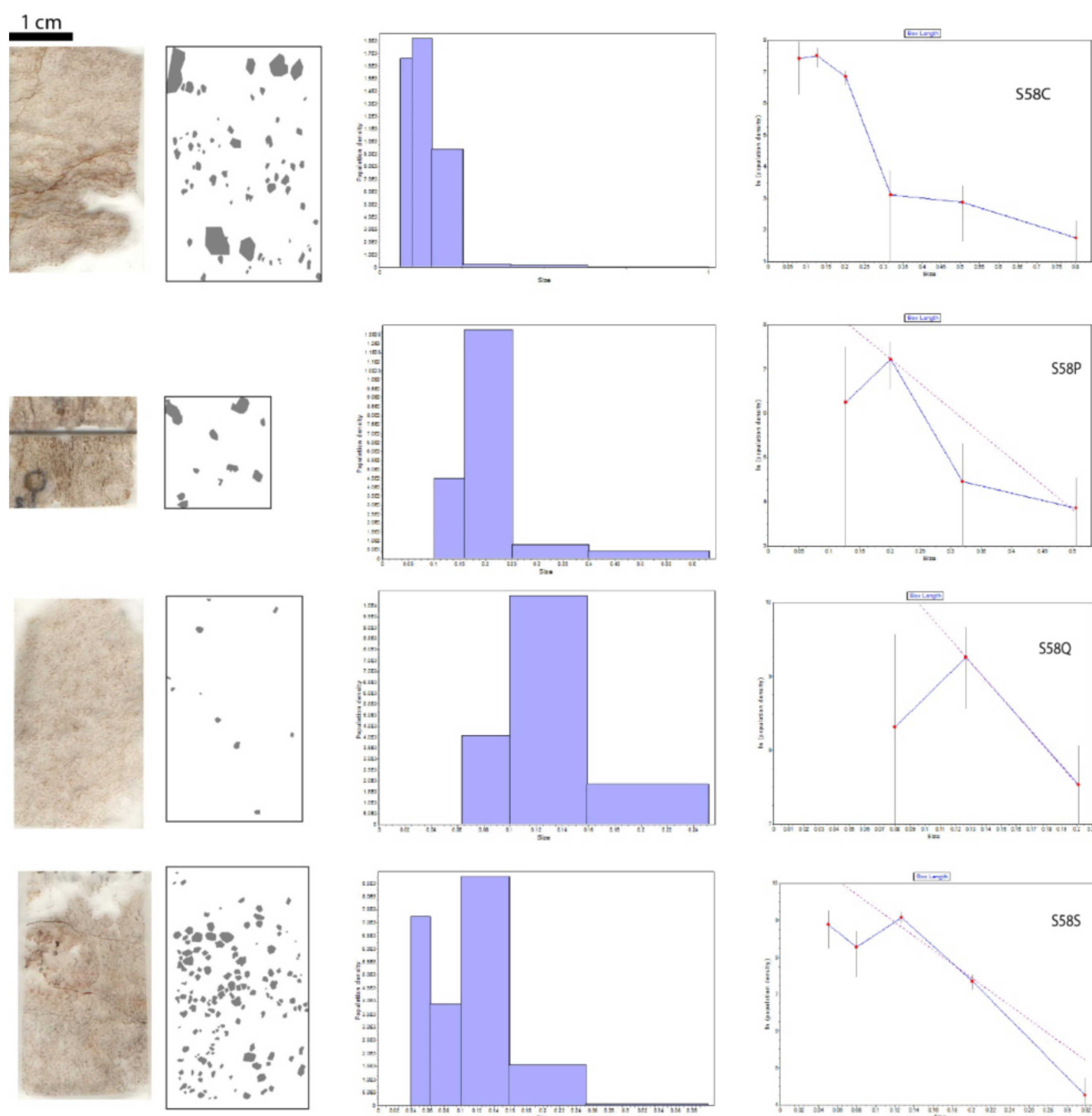


شکل ۶ الف) نمودار رده‌بندی سنگ‌های رسوبی برای سنگ مادر سنگ رسی دگرگونه برگرفته از مرجع [۴۲] که مرزها براساس مرجع [۴۳] اصلاح شده‌اند. سنگ مادر شیست‌ها از نوع ماسه سنگ تیره، لیت آرنایت و آرکوز و سنگ مادر هورنفلس‌ها همه گریوکی بوده است. ب) نمودار رده-بندی نمونه‌های رسی [۳۸]. نمونه‌های شیست‌های شاهیندژ از نوع شیل و ماسه سنگ تیره حتی آرکوز و نمونه‌های هورنفلس‌های دوربه از نوع شیل آهنی ارزیابی می‌شود.



شکل ۷ طرحواره مقاطع نازک از شکفته بلورهای گارنت، نمودار تجمعی ستونی برای دانه‌های گارنت و نیز نمودار توزیع ابعاد بلوری برای گارنت-های هورنفلس‌های دوربه اشنویه.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.3.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.297]



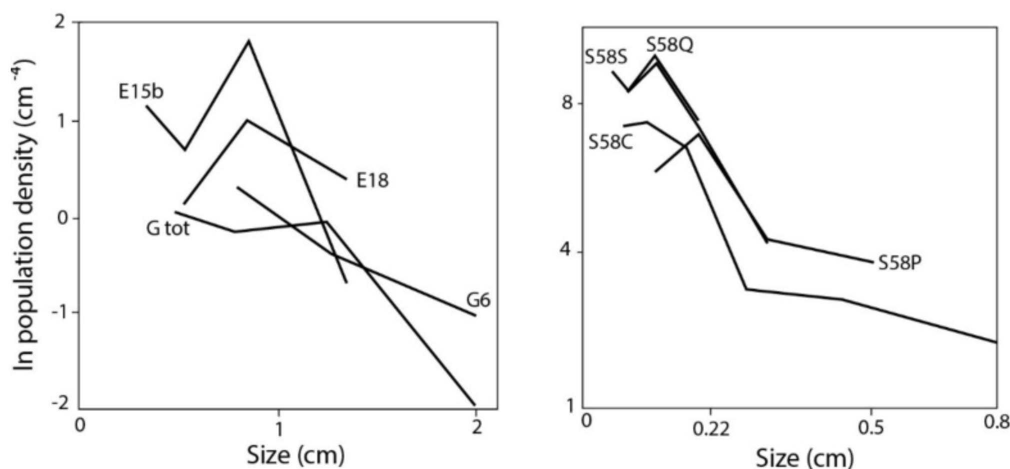
شکل ۸ طرحواره مقاطع نازک از شکفته بلورهای گارنت، نمودار تجمعی ستونی برای دانه‌های گارنت و نیز نمودار توزیع ابعاد بلوری برای گارنت-های موجود در شیست‌های شاهیندژ (SMC).

از آنجاکه در بررسی‌های پیشین به دگرگونی چند فازه در این منطقه اشاره شده است، این امر مورد انتظار بود. بنابراین دو جمعیت آماری در شیست‌های شاهیندژ دیده می‌شود: تعدادی بسیار دانه‌ریز با هسته‌های متعدد (نیمه سمت چپ نمودار) و تعدادی درشت‌تر با تعداد هسته کمتر (نیمه سمت راست نمودار) که هر کدام در یک فاز دگرگونی مجزا تشکیل شده‌اند. خمش در منحنی CSD بیانگر تغییر شرایط تبلور است. شکل ۹ امکان مقایسه دو الگو ناحیه‌ای و مجاورتی را فراهم نموده است، در حالیکه شکل ۱۰ تفاوت نرخ هسته بندی و رشد را با توجه به دو معادله خط وایازشی با شیب‌های کاملا متفاوت را به خوبی نشان می‌دهد. این امر در کنار ترکیب بسیار مناسبتر هورنفلس‌ها از نظر محتوای سنگ کل غنی از آلومینیوم و آهن (جدول ۱) برای تبلور آلماندن، می‌تواند نشانه‌ای از درجه بسیار بالای خروج از حالت تعادل در سنگ-

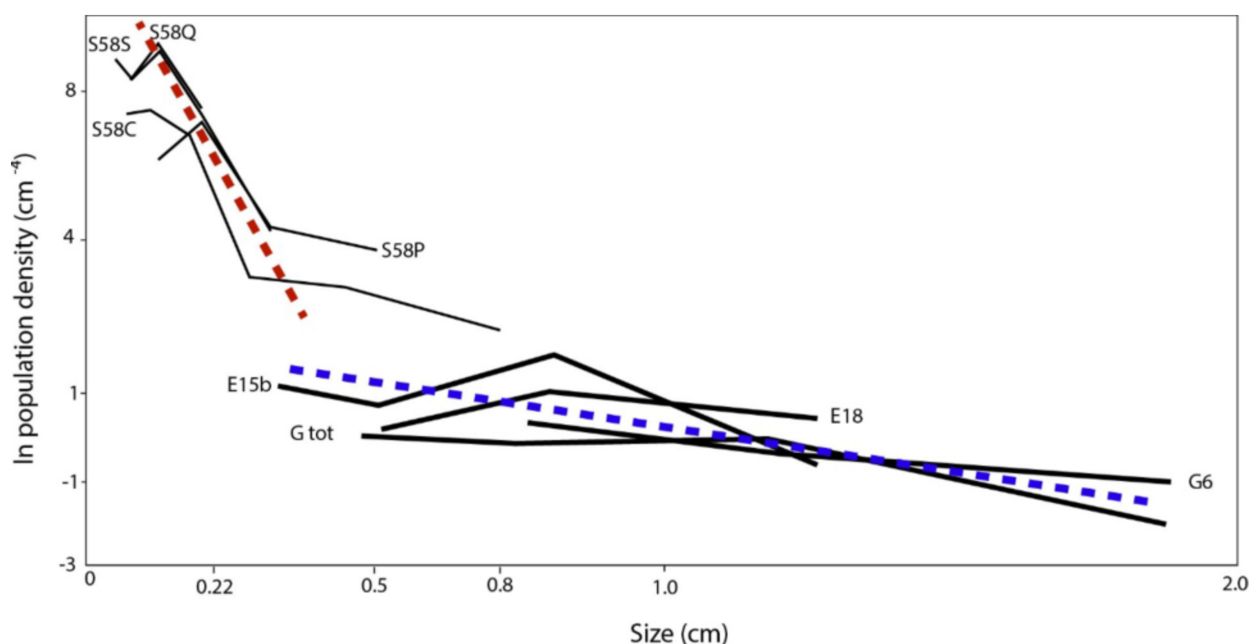
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.3.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.297]

های دگرگونی ناحیه‌ای نسبت به مجاورتی باشد. این عامل منجربه جایگاه‌های هسته‌بندی بسیاری می‌شود که سرانجام مانع رشد قابل توجه دانه‌ها می‌کردند. البته گفتنی است که عامل اصلی عدم رشد کافی بلورهای گارنت در شیست‌ها ترکیب نامناسب آن‌ها برای رشد گارنت است (شکل ۱۰). حضور سیال‌ها در این میان هم از نظر بازدارندگی از نطفه‌بندی زیاد و هم از نظر کمک برای انتقال یون‌ها به جایگاه هسته‌بندی به ویژه در هاله مجاورتی مهم است. گارنت در حضور سیال غنی از آب پایدار است [۴۴]، پس بنظر می‌رسد که سیال اصلی در سنگ رسی دگرگونه‌های دوربه آب با فعالیت بالا بوده که منجر به درشت‌شدگی قابل ملاحظه شکفته بلورهای گارنت شده است (شکل ۱۰).

عوامل دیگری نیز با درجه اهمیت کمتر ارزش بررسی دارند از جمله نوع واکنش‌های دگرگونی مولد گارنت که نرخ انتشار یون‌ها را کنترل می‌کند و ترکیب و شکل بلور تابعی از آن است. همچنین در ظاهر شکل هندسی بلور گارنت غنی از آلماندن به نسبت مجموع منگنز و منیزیم به کلسیم (Mn+Mg/Ca) سنگ حساس است [۴۵].



شکل ۹ نمودار های توزیع ابعاد بلورهای گارنت موجود در الف) هورنفلس‌های دوربه اشنویه و ب) شیست‌های شاهیندژ (SMC).



شکل ۱۰ مقایسه الگوی CSD گارنت های شیست‌های شاهیندژ (خطوط سیاه نازک) با هورنفلس‌های دوربه (خطوط سیاه پر رنگ). شیب خط وایازش چشمی برای شیست‌های شاهیندژ با خط چین قرمز و برای هورنفلس‌های دوربه با خط چین آبی نشان داده شده است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.3.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.297]

مطالعات دقیق نشان داده است بافت سنگ‌های دگرگونی حاوی گارنت بیش از اینکه توسط جوش خوردگی (Ostwald ripening) و اتصال بعدی بلورها بوجود آمده باشد، ماحصل دمای حدی مورد نیاز جهت تبلور و نرخ هسته بندی اولیه وابسته به ترکیب سنگ کل است [۹]. ممکن است تفاوت در اندازه گارنت‌ها در سنگ‌های مختلف حتی ناشی از میزان دمایی باشد که بسته به ترکیب سنگ برای تبلور گارنت نیاز است. گرچه توالی واکنش‌های سازنده گارنت، ترکیب پروتولیت و درجه دگرگونی همگی از عوامل مؤثر بر رشد کنترل شده توسط واکنش‌ها، تفریق رایلی و رشد تعادلی گارنت هستند [۴۶]. باید در نظر داشت هسته بندی و رشد تابعی از شدت دریافت حرارت بالا باشد (یعنی میزان دمای دریافتی در واحد زمان بزرگ باشد) ولی اگر میزان دمای دریافتی کم باشد فرایندهای نظیر جوش‌خوردگی بعدی می تواند در شکل الگوی CSD مؤثر باشد [۴۷]. رابطه تنگاتنگی بین تاریخچه واکنش‌های مولد گارنت و زمان‌گذاری برای رشد کانی وجود داشته و نیز نرخ پدیده‌های تکتونیکی و دمایی حاکم بر سنگ‌ها بخصوص در دگرگونی ناحیه‌ای، در شکل این الگو نقش دارند [۱۱].

برداشت

با در نظر داشتن ترکیب بسیار مشابه بلورهای آلماندنی در هر دو گروه شیست‌های شاهیندژ و هورنفلس‌های دوربه می‌توان نتایج زیر را گرفت:

- متوسط مساحت هر بلور گارنت در شیست‌های شاهیندژ تنها ۰٫۰۲ سانتیمتر مربع بوده در حالیکه این عدد برای هورنفلس‌های دوربه ۰٫۸۲ سانتیمتر مربع است، یعنی در هورنفلس‌های دوربه مقدار رشد گارنت ۴۰ برابر شیست‌های شاهیندژ بوده است (جدول ۳).
- نسبت هسته‌بندی به رشد (برآمده از عرض از مبدأ نمودار)، برای هورنفلس‌های دوربه یک چهارم آن در شیست‌های شاهیندژ بوده است. یعنی هسته‌های گارنت در شیست‌ها ۴ برابر بوده است. تعداد هسته گارنت هورنفلس‌ها یک چهارم شیست‌ها بوده ولی رشد گارنت در آنها ۴۰ برابر شیست‌ها بوده است (جدول ۳).
- در کل می‌توان یک شیب کلی تند را برای شیست‌های شاهیندژ و یک شیب بسیار ملایم و مسطح را برای هورنفلس‌های دوربه در نظر گرفت (شکل ۱۰). تعداد هسته‌ها در دگرگونی ناحیه‌ای بسیار بیشتر و میزان رشد در آنها ناچیز بوده است (جدول ۳). این شاید بدلیل درجه بالای خروج از حالت تعادل و نیز نامناسب بودن ترکیب شیست‌ها برای رشد گارنت بوده باشد.
- هورنفلس‌های دوربه دارای تعداد هسته‌های بسیار کم بوده‌اند (جدول ۳) در حالی که رشد قابل توجهی را تجربه نموده‌اند.
- برای درشت‌شدگی بلورها در هورنفلس‌ها ترکیب مناسب عامل اصلی محسوب می‌شود و عوامل جانبی دیگر چون سیال‌ها در دگرگونی مجاورتی نیز از طریق ممانعت از نطفه-بندی زیاد، عامل تسریع و تسهیل مهاجرت یون‌ها به جایگاه هسته‌بندی بوده و مقدمات رشد بسیار را فراهم نموده‌اند.

مراجع

[1] Morgan D.J., Jerram D.A., *"On estimating crystal shape for crystal size distribution analysis"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 154 (2006) 1–7.

[2] Higgins M. D., Roberge J., "*Crystal size distribution (CSD) of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Monteserrat: evidence for dynamic crystallization textural coarsening cycles*", Journal of Petrology 44 (2003) 1401-1411.

[3] Winkler H. G. F., "*Crystallization of magma as recorded by variation of crystal size in dikes*", Mineral Mag 28 (1949) 557-574.

[4] Lane A. C., "*Studies of the grains of igneous intrusions*", Geol Soc Am Bull 14 (1902) 369-384.

[5] Gray N. C., "*Pure shear and simple shear deformation of inhomogeneous viscous fluids 2, The determination of the total finite strain in a rock from objects such as deformed pebbles*", Tectonophysics 5 (1970) 295-302.

[6] Higgins M. D., "*Quantitative textural measurement in igneous and metamorphic petrology*", Cambridge university press (2006) 265p.

[7] Marsh B. D., "*CSD in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization (II)*", Contrib Mineral Petrol 99 (1988) 292-305.

[8] Nkono C., Femenlas O., Diot H., Berza T., Demaiffe D., "*Flowage differentiation in an andesitic dyke of the Motru Dyke Swarm (Southern Carpathians, Romania) :Evidence from AMS, CSD and geochemical investigations*", Journal of

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.3.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.297]

[20] Raeisi D., Dargahi S., Moeinzadeh H., Arvin M., "*Using Numerical Modeling for Estimation of Rate of Nucleation and Growth Time of Plagioclase Microlites from Quaternary Gandom Beriyan Basaltic Flows, NE of Kerman",* Geosciences 22 (2013) 199-204 (in Persian).

[21] Torkian A., Salehi N., Kord M., "*The use of quantitative data crystal size distributions (CSD) of pyroxenes crystals in study of petrological , process of NE-Qorveh volcanic centers (Kurdistan)*", Petrology 4 (2013) 33-46 (in Persian).

[22] Rahimi Chakdel A., Boyle A.P., *"Crystal size distribution analysis of quartz in sector-zoned of garnet schist using Back-scatter electron images",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 20 (3) (2012) 49-58 (in Persian).

[23] Modjarrad M., Sheykhbaglou S., *"Crystal size distribution of amphibole and plagioclase from Zanbil adakitic dacites, Urmia-Iran: Evidence for magma mixing and textural coarsening",* Acta Geodynamic Geomaterials 181 (2016) 89-101.

[24] Modjarrad M., *"Crystal size distribution of amphiboles from Bezow dacites, Urmia, Iran",* Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie-Abhandlungen 276 (2015) 101-110.

[25] Modjarrad M., Sheykhbaglou S., "*Crystal Size Distribution of kyanite and staurolite from Hamza Qassim and Khazai Bala Metapelites-southeast Shahin-Dezh; confirmation to regional metamorphism conditions at the area*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (2016) 99-108 (in Persian).

[26] Kazemi K., Kananian A., Sarjoughian F., *"Physical conditions and magmatic processes by crystal size distributions in the granitoids from the Byarjomand Batholith, north-central Iran", Iranian* Journal of Crystallography and Mineralogy 25 (2017) 581-594 (in Persian).

[27] Barzgari L., Ghasem H., M. Rezaei-Kahkhaei M., *"Crystal size distribution analysis of plagioclase and pyroxene in basaltic and andesitic rocks of Abbasabad Area, east of Shahrood", Iranian* Journal of Crystallography and Mineralogy 26 (2018) 63-78 (in Persian).

[28] Modjarrad M., *"Crystal size distribution studies on the leucite, pyroxene and olivine at the eastern Urmia Lake volcanic rocks- magma mixing possibility and residence time at the chamber", Iranian* Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 55-68 (in Persian).

[29] Modjarrad M., *"Petrology and geodynamic of Igneous and metamorphic rocks of eastern* Volcanology and Geothermal Research 154 (2006) 201-221.

[9] Hirsch D.M., *"Quantitative studies of porphyroblastic textures",* Ph.D thesis at The University of Texas at Austin (2000) 432p.

[10] Moore S.J., *"Crystallization of metamorphic garnet: nucleation mechanisms and yttrium and rare-earth-element uptake",* Dissertation (2014).

[11] Burton K.W., O'Nions R.K., *"High-resolution garnet chronometry and the rates of metamorphic processes",* Earth and Planetary Science Letters 107 (1991) 649-671.

[12] Zeh A., *"Crystal Size Distribution (CSD) and Textural Evolution of Accessory Apatite, Titanite and Allanite during Four Stages of Metamorphism: an Example from the Moine Supergroup, Scotland",* Journal of Petrology 45 (2004) 2101-2132.

[13] Zeh A., "Calculation of Garnet Fractionation in Metamorphic Rocks, with Application to a Flat-Top, Y-rich Garnet Population from the Ruhla Crystalline Complex, Central Germany", Journal of Petrology 47 (2006) 2335-2356.

[14] Muller T., Baumgartner L.P., Foster, C.T., Bowman J.R., *"Crystal Size Distribution of Periclase in Contact Metamorphic Dolomite Marbles from the Southern Adamello Massif, Italy",* Journal of Petrology 50 (2009) 451-465.

[15] Whitney D.L., Goergen E.T., Ketcham R.A., Kunze K., *"Formation of garnet polycrystals during metamorphic crystallization",* Journal of Metamorphic Petrology 26 (2008) 365-383.

[16] Homam S.M., "*Crystal size distribution in metamorphic rocks: an example for the relationship between nucleation and growth rates with overstepping*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 11 (2003) 65-81 (in Persian).

[17] Moazzen M., Modjarrad M., *"Contact metamorphism and crystal size distribution studies in the Shivar aureole, NW Iran"*, Geological Journal 40 (2005) 499-517.

[18] Ayati F., Mahdevari S., "*Investigation of crystal size distribution in igneous rocks: Guide to the magma evolution in magma chambers*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 18 (2010) 419-430 (in Persian).

[19] Zandifar S., Valizadeh M.V., Barghi M.A., Farhoodijahromi M.A., *"Crystal size distribution (CSD) of garnet in the Hassan-Abad vontact metamorphism of Yazad*", Geosciences 19 (2009) 147-152 (in Persian).

[38] Higgins M.D., *“Closure in crystal size distribution (CSD), verification of CSD calculations and the significance of CSD fans”,* American Mineralogist, 87 (2002) 171–175.

[39] Daniel C.G., Spear F., "3-Dimensional patterns of garnet nucleation and growth", Geology 26(6) (1998).

[40] Kaneko Y., Tsunogae T., Miaro T., *"Crystal Size Distributionn of garnet in metapelites from the northeastern Bushveld contact aureole, South Africa",* American Mineralogist 90 (2005) 1422-1433.

[41] Spear F.S., *"Metamorphic phase equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths",* Mineralogical society of America (1993) 799p.

[42] Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R., "Sand and Sandstones", New York, Springer-Verlag (1972).

[43] Herron M. M., *"Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data"*, Journal of Sedimentary Petrology 58 (1988) 820-829.

[44] Shelley D., *"Igneous and metamorphic rocks under the microscope",* Chapman and Hall (London) (1993) 445p.

[45] Baharifar AA., Pang K.N., Chung SL., *"Morphological changes in garnet crystals from staurolite schists of Aliabad-Damagh area, South of Hamedan, Iran", Iranian* Journal of Crystallography and Mineralogy 2 (2017) 381-392 (in Persian).

[46] Loomis T.P., *"Numerical simulation of the disequilibrium growth of garnet in chloritoid-bearing aluminous politic rocks",* Canadian Mineralogist 20 (1982) 411-423.

[47] Miyazaki K., *"Ostwald ripening of garnet in high P/T metamorphic rocks",* Contributions to Mineralogy and Petrology 108 (1991) 118-128.

Shahindeh, NW Iran", PhD unpublished Thesis (2007) Tabriz University (in Persian).

[30] Modjarrad M., Moazzen M., Moayyed M., *"Contact metamorphism in the Shahindezh metamorphic Core (SMC) NW-Iran; PT conditions and microstructural evidence for partial melting* of metapelites", *Iranian* Journal of Crystallography and Mineralogy 2 (2007) 493-514 (in Persian).

[31] Modjarrad M., Moazzen M., Moayyed M., *"HT-MP metamorphism at the Shahindezh Metamorphic Core (SMC) – NW Iran; Mineral chemistry and thermobarometry of metapelites", Iranian* Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2008) 3-12 (in Persian).

[32] Modjarrad M., Mohamed A., *"Index reaction textures and T estimation of Oshnavieh Eslamlu (W-Azarbaijan) metamorphic aureole", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 22* (2015) *671-684 (in* Persian*).*

[33] Mohamed A., Modjarrad M.,*"Provenance and equilibrium studies of Eslamlu metapelites, Oshnavieh, NW Iran", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 22* (2015) *607-620 (in* Persian*).*

[34] Aghanabati A., *"Geology of Iran",* Geological Survey of Iran (2004) 586p.

[35] Modjarrad M., Moazzen M., Moayyed M., *"Whole rock chemistry of Shahindezh metapelites; Provenance and mineral parageneses",* Petrology 4 (2010) 73-88 *(in* Persian*).*

[36] Mahmoodi B., *"Mineralogy and geochemistry of Oshnavieh garnet, Western Azarbaijan",* Bsc unpublished Thesis (2018) Urmia University (in Persian).

[37] Higgins M.D., Roberge J., *“Three magmatic components in the (1973) eruption of Eldfell Volcano, Iceland: evidence from plagioclase crystal size distribution (CSD) and geochemistry”,* Journal of Volcanology and Geothermal Researches, 161 (2007) 247–260.